

波長制御による電気光学プローブの光学的バランス調整に関する研究

著者	岡田 陸
出版者	法政大学大学院理工学・工学研究科
雑誌名	法政大学大学院紀要．理工学・工学研究科編
巻	62
ページ	1-4
発行年	2021-03-24
URL	http://doi.org/10.15002/00023959

波長制御による電気光学プローブの 光学的バランス調整に関する研究

OPTICAL BALANCE ADJUSTMENT FOR ELECTRO-OPTIC PROBE
BY CHANGING LASER DIODE WAVELENGTH

岡田陸

Riku OKADA

指導教員 品川満

法政大学大学院理工学研究科応用情報工学専攻修士課程

This paper describes the improvement of the signal-to-noise ratio (SNR) of an electro-optic probe. Differential detection is used to improve the SNR by optical balance adjustment. The optical balance is adjusted by changing the wavelength of the laser source. We simulated the optical balance adjustment using a Jones matrix.

Key Words : *Differential detection, optical balance adjustment, Jones matrix, retardation*

1. 序論

近年では機器の小型化が急速に発展しており、ほんの一例としてスマートフォンやウェアラブル端末が挙げられる。これらの小型化に伴い、信号測定も小型化に対応していく必要がある。信号測定には接触測定と非接触測定の2つの方法が存在する。接触測定は現在一般的な測定方法であるが、接触するたびに被測定物を傷つけるデメリットがある。一方非接触測定は、構造が複雑で現在一般的な測定方法とは言えないが、非接触であるため被測定物を傷つけることはない。私は小型化により被測定物が繊細になる中で、傷つけずに測定ができる非接触測定に注目し、そのなかでも電気光学(EO: Electro Optic)プローブ[1]に着目した。EO プローブとは EO 結晶の電気光学効果[2]とレーザ光を用いた非接触測定器で、広帯域な測定が可能と考えられている。使用例としては集積回路[3]、人体通信機器[4]及び有機薄膜太陽電池[5]などの故障検知が挙げられる。しかし現状の EO プローブは温度変化の影響を受けて測定値が変動してしまう問題があり、測定精度において実用化できる段階ではない。そこで EO プローブの測定精度向上のための方法をこの論文では提案する。

本論文では EO プローブの仕組み、問題点及び解決策を2章で説明し、解決策におけるシミュレータの説明と評価指標を3章で述べる。4章では各評価指標のシミュレーション結果とその考察について述べ、5章で結論と今後の展望について述べる。

2. EO プローブシステム

EO プローブの仕組みについて図1を用いて説明する。EO プローブは光源部、センサ部、受光部の3つに分けられる。光源部ではレーザダイオード(LD: Laser Diode)からレーザ光が射出されている。センサ部では1/4波長板(QWP: Quarter Wave Plate)、EO結晶、半波長板(HWP: Half Wave Plate)、偏光ビームスプリッタ(PBS: Polarizing Beam Splitter)が含まれており、レーザ光の偏光状態を適切な形に変化させて被測定物の電界を測定している。受光部ではレーザ光をフォトダイオード(PD: Photo Diode)で電気信号に変換し、差動アンプを通して出力される。

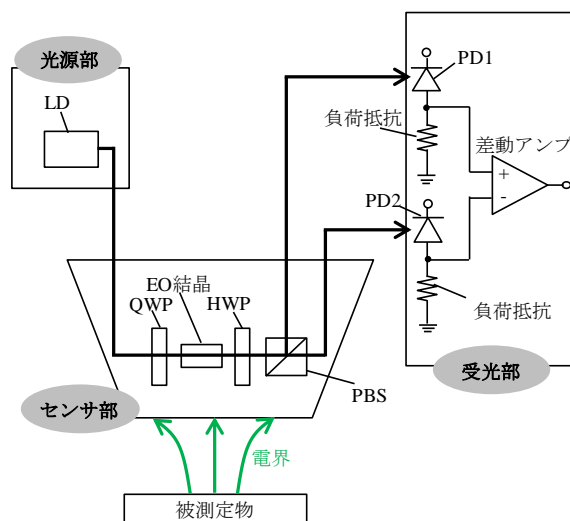


図1 EO プローブ系

既存の EO プロブは、温度変化の影響を受けて測定値が変動してしまう問題がある。これは温度変化によって EO プロブ内の光学素子が膨張もしくは収縮するためであると考えられる。EO プロブの精度向上のためには温度変化の影響を差し引く必要がある。従来では温度変化の影響を差し引く手法として、機械的手法と電気的手法[6]が考えられていた。しかし機械的手法は小型化できず、電気的手法は差し引けない雑音が発生してしまう。そこで私は EO プロブの光源として使用している LD の波長を制御することで、温度変化の影響を差し引く光学的手法を新たに提案する。ここで波長に注目した理由を説明する。(1)式に波長板のリタデーション $\Gamma_{WP}(\lambda)$ と波長の関係式、(2)式に EO 結晶のリタデーション $\Gamma_{EO}(\lambda)$ と波長の関係式を示す。

$$\Gamma_{WP}(\lambda) = \Gamma_0 \times \frac{\lambda_0}{\lambda} \quad (1)$$

$$\Gamma_{EO}(\lambda) = \frac{\pi V}{V_{\pi,0}} \frac{\lambda_0}{\lambda} \quad (2)$$

Γ_0 はレーザ光の波長が λ_0 の時の波長板のリタデーション、 V は EO 結晶への印過電圧、 $V_{\pi,0}$ はレーザ光の波長が λ_0 の時の半波長電圧、 λ はレーザ光の波長、 λ_0 は 1310 nm とする。(1)、(2)式より波長板及び EO 結晶のリタデーションが波長と反比例の関係である。EO プロブの測定値はレーザ光の偏光状態に依存しており、偏光状態はリタデーションに依存することから、波長を制御することで EO プロブの測定値を制御できると考えた。図 2 に光学的手法を用いた EO プロブ系を示す。提案した光学的手法は EO プロブに適用しても実現可能かシミュレーションで確かめる。

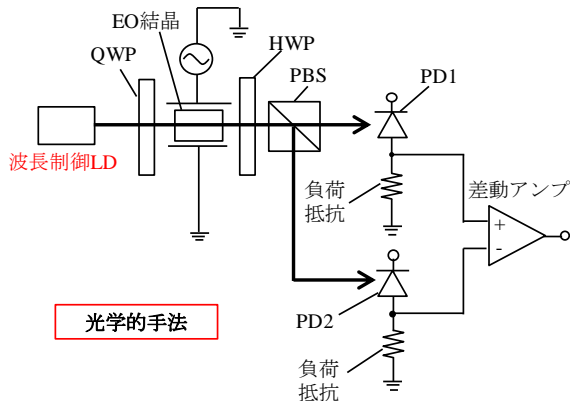


図2 光学的手法を用いた EO プロブ系

3. シミュレーション方法

シミュレーションはプログラミング言語 C#を用いて行う。またレーザ光の偏光状態の計算にあたりジョーンズマトリックスを使用する。ジョーンズマトリックスとは、光の偏光状態を疑似的に計算して表現する 2×2 の行列で光学素子ごとに決まっている。またジョーンズベク

トルとは、レーザ光の偏光状態をベクトルで表したものである。光学素子透過後のレーザ光の偏光状態は、透過前のジョーンズベクトルと光学素子のジョーンズマトリックスの掛け算で表現される。次に透過率[7]について説明する。透過率とは結晶を透過する前後の光パワーの比率である。(3)式に P 波の透過率 T_P を、(4)式に S 波の透過率 T_S を示し、図 3 に透過率のグラフを示す。ここで I_P は P 波の出力の光パワー、 I_S は S 波の出力の光パワー、 I_L は入射光のパワー、 $\Gamma(t)$ は印過電圧によって時間変化するリタデーション、 Γ_B はそのバイアス成分である。

$$T_P = \frac{I_P}{I_L} = \frac{1}{2} (1 + \sin(\Gamma(t) + \Gamma_B)) \quad (3)$$

$$T_S = \frac{I_S}{I_L} = \frac{1}{2} (1 - \sin(\Gamma(t) + \Gamma_B)) \quad (4)$$

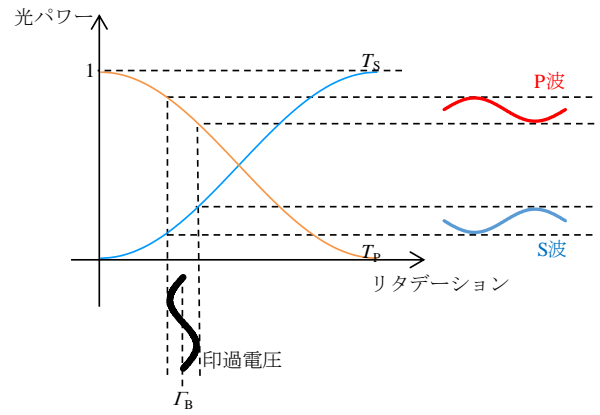


図3 透過率

シミュレーションを実行するにあたり 3 つの評価指標を定義する。最初に 1 つ目の評価指標である直流(DC: Direct Current)バランス V_{DC} について説明する。DC バランスとは差動アンプの出力信号の DC 成分であり、P 波と S 波が受光部の PD で電気信号に変換されたときの DC 成分の差で表される。今回シミュレーションで V_{DC} を求めるために、EO 結晶への印過電圧の振幅は 0 V として計算する。そのため(3)、(4)式の $\Gamma(t)$ が 0 となる。図 4 に V_{DC} 算出方法の概略図を示す。

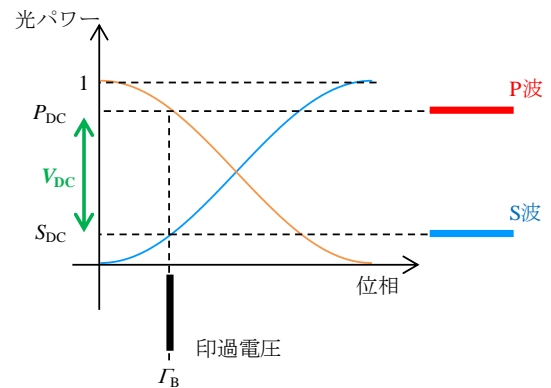


図4 V_{DC} 算出方法

P_{DC} を P 波のバイアス成分, S_{DC} を S 波のバイアス成分とすると, 1 つ目の評価指標 V_{DC} は(5)式で表される.

$$V_{DC} = P_{DC} - S_{DC} \quad (5)$$

次に 2 つ目の評価指標である信号成分 V_{SIG} について説明する. このシミュレーションでは印過電圧に振幅 S_0 , 周波数 f_S の正弦波を用いて, バイアス成分である Γ_B も印加して計算した. V_{SIG} を求めるための P 波と S 波の透過率の式を(6), (7)式にそれぞれ示し, V_{SIG} 算出方法の概略図を図 5 に示す.

$$T_P = \frac{1}{2} (1 + \sin(S_0 \sin(2\pi f_S t) + \Gamma_B)) \quad (6)$$

$$T_S = \frac{1}{2} (1 - \sin(S_0 \sin(2\pi f_S t) + \Gamma_B)) \quad (7)$$

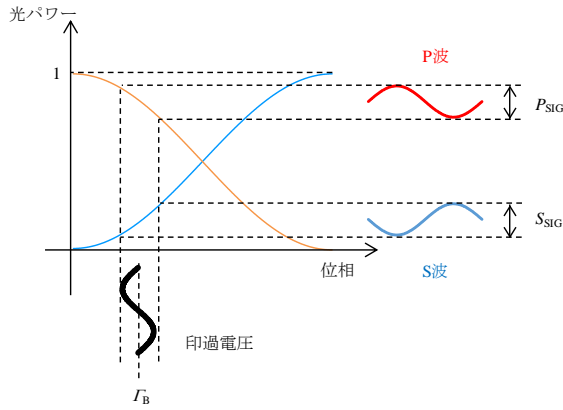


図 5 V_{SIG} 算出方法

ここで P_{SIG} を P 波の振幅, S_{SIG} を S 波の振幅とする. P 波と S 波の位相は逆位相であり, 差動アンプではそれぞれ足し合わされるため, 2 つ目の評価指標 V_{SIG} は(8)式で表される.

$$V_{SIG} = P_{SIG} + S_{SIG} \quad (8)$$

最後に 3 つ目の評価指標である雑音成分 V_{NOISE} について述べる. このシミュレーションでは印過電圧を 0 V とする代わりに, 透過率に振幅 N_0 , 周波数 f_N の正弦波の雑音を掛け合わせた[8]. 印過電圧のバイアス成分 Γ_B は印加している. V_{NOISE} を求めるための P 波の透過率の式を(9)式, S 波の透過率の式を(10)式に示し, 図 6 に V_{NOISE} 算出方法の概略図を示す.

$$T_P = \frac{1}{2} (1 + N_0 \sin(2\pi f_N t)) (1 + \sin(\Gamma_B)) \quad (9)$$

$$T_S = \frac{1}{2} (1 + N_0 \sin(2\pi f_N t)) (1 - \sin(\Gamma_B)) \quad (10)$$

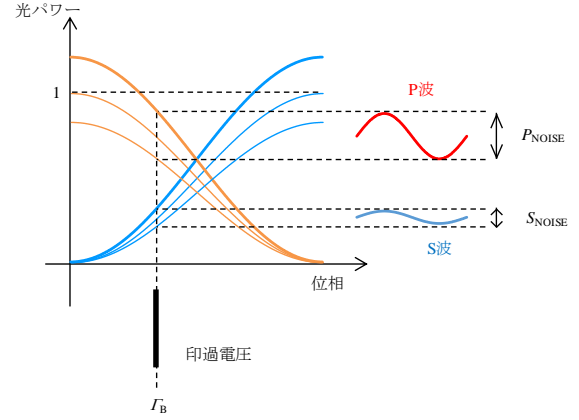


図 6 V_{NOISE} 算出方法

ここで P_{NOISE} を P 波の振幅, S_{NOISE} を S 波の振幅とする. P 波と S 波の位相は同位相であり, 差動アンプではそれぞれ引き合うため, 3 つ目の評価指標 V_{NOISE} は(11)式で表される.

$$V_{NOISE} = P_{NOISE} - S_{NOISE} \quad (11)$$

波長を 1307 nm から 1312 nm まで 0.1 nm 刻みで変化させたとき, 定義した 3 つの評価指標がどう値変動するかシミュレーションを用いて確認する.

4. シミュレーション結果

1 つ目の評価指標 V_{DC} のシミュレーション結果を図 7 に示す.

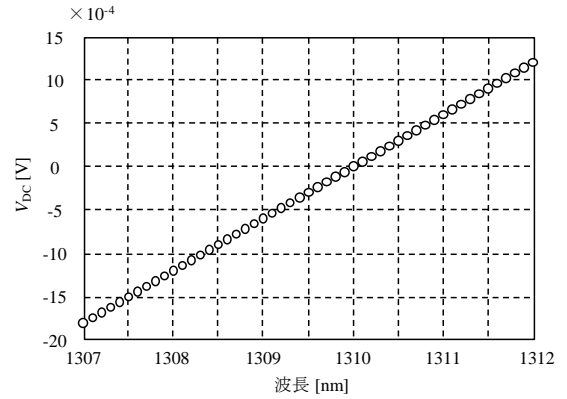


図 7 V_{DC} シミュレーション結果

波長に対して V_{DC} は正比例関係にあり, 波長が 1310 nm の時に V_{DC} が 0 V となった. 1310 nm とは使用している光学素子の基準に設定した波長である. この結果は, 温度変化の影響で V_{DC} が 0 V からずれてしまっても, レーザ光の波長を変化させることで 0 V に調整可能であることを示している. 次に 2 つ目の評価指標 V_{SIG} のシミュレーション結果を図 8 に示す.

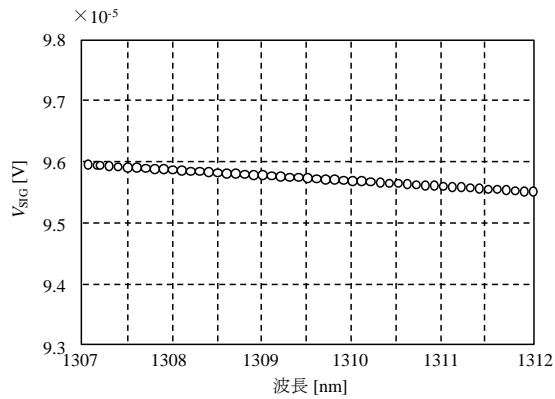


図 8 V_{SIG} シミュレーション結果

V_{SIG} は波長に対してなだらかに小さくなっていった。これは(1), (2)式の波長とリタデーションが反比例関係であることから妥当な結果であると言える。最後に3つ目の評価指標 V_{NOISE} のシミュレーション結果を図9に示す。

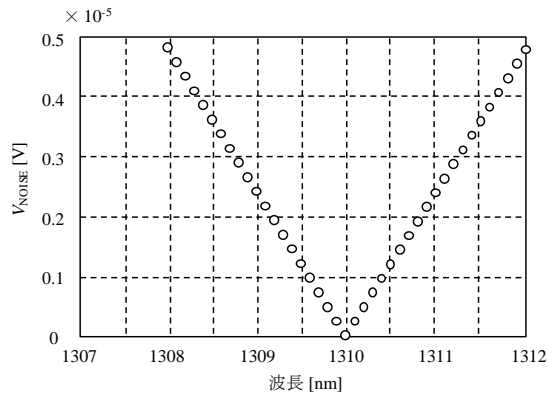


図 9 V_{NOISE} シミュレーション結果

V_{NOISE} は 1310 nm で 0 V, つまり雑音を完全に差し引く結果となった。また 1310 nm から少しずれると雑音が発生する V 字型の結果となった。次に EO プロブの精度を求めるため、 V_{SIG} と V_{NOISE} の結果をもとに信号対雑音比 (SNR: Signal to Noise Ratio) 評価を行う。 V_{SIG} の結果を V_{NOISE} の結果で割った SNR シミュレーション結果を図10に示す。

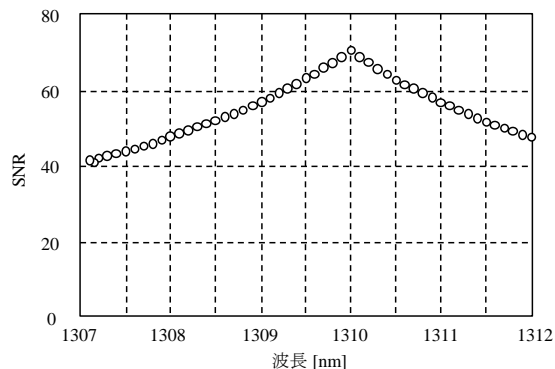


図 10 SNR シミュレーション結果

ここで 1310 nm では V_{NOISE} は 0 V で割り算ができないため、すべての波長において一定の差し引けない雑音を 0.1 mV 加えて SNR を算出した。この結果より 1310 nm で SNR が最大になることが分かる。 V_{DC} が 0 V の時に SNR が最大であり、 V_{DC} は波長と正比例関係であることから、波長制御により SNR は調整できることが分かった。

5. 結論

本論文では、非接触型測定器である EO プロブの温度変化の影響を差し引くために、レーザ光の波長を制御する光学的手法を提案し、この手法が EO プロブに適用可能かシミュレーションで確認した。シミュレーションの偏光状態の計算にはジョーンズマトリックスを用いた。シミュレーション結果より DC バランス V_{DC} は波長に正比例関係で、1310 nm で 0 V となった。信号成分 V_{SIG} は波長に対してなだらかに小さくなり、雑音成分 V_{NOISE} は 1310 nm で 0 V となり、それ以外の波長では雑音が発生する V 字型の結果となった。EO プロブの精度を示す SNR 評価を行うと SNR は 1310 nm で最大となった。これらより、 V_{DC} が 0 V の時に SNR が最大となり、 V_{DC} は波長と正比例関係であるので、波長制御による EO プロブの SNR 最適化が可能であり、光学的手法が適用できることが証明された。

参考文献

- 1) Valdmanis, J. A. et al. : Subpicosecond electrical sampling, IEEE Journal Quantum Electronics, Vol.19, No.4, pp.664-667, 1983
- 2) Pockels, F. : Lehrbuch der Kristalloptik, Leipzig: Teubner 1906
- 3) Shinagawa, M. et al. : A laser-diode-based picosecond electrooptic probe for high-speed LSI's, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol.41, No.3, pp.375-380, 1992
- 4) Sasaki, A. et al. : Principles and demonstration of intrabody communication with a sensitive electrooptic sensor, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol.58, No.2, pp.457-466, 2009
- 5) Katsuyama, J. et al. : Failure Diagnosis of Organic PhotoVoltaic Using Electro-Optic Probe, Optical Review, Vol.21, pp.621-627, 2014
- 6) Yada, M. et al. : Noise reduction method for electro-optic measurement system using variable gain amplifier, TENCON 2017-2017 IEEE Region 10 Conference, pp.1969-1972, 2017
- 7) 品川満 : フォトニック電界センサの応用技術に関する研究, 博士論文, 2005
- 8) Ogawa, T. et al. : Differential Detection for Reduction Laser Noise in Electro-Optic Sensor System, IEEE International Conference on Sensing Technology, pp.240-244, 2018